

Análisis sedimentológico y caracterización paleoclimática de la sucesión cíclica de Orera, Mioceno continental de la Cuenca de Calatayud

E. Sanz-Rubio ¹, H. Abdul-Aziz ², J.P. Calvo ³, F. Hilgen ² y W. Krijgsman ⁴

¹ Centro de Astrobiología (INTA-CSIC). Ctra. de Ajalvir Km 4. 28850 Torrejón de Ardoz. Madrid. mensr524@mncn.csic.es.

² Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Utrecht University, Budapestlaan 4. 3584 CD Utrecht. Holanda. haziz@geo.uu.nl, fhilgen@geo.uu.nl.

³ Departamento de Petrología y Geoquímica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense, 28040 Madrid, jpcalvo@eucmax.sim.ucm.es.

⁴ Paleomagnetic Laboratory "Fort Hoofddijk", Utrecht University, Budapestlaan 14. 3584 CD Utrecht. Holanda.

ABSTRACT

The representation of continental and continuous cyclically bedded sequences for long time intervals in the sedimentary record of the Iberian Peninsula is very scarce. The middle Miocene sedimentary fill of the Calatayud Basin (NE Spain) consists of proximal to distal alluvial fan-floodplain and shallow lacustrine deposits. A 160 m-thick lacustrine succession showing an exceptional cyclical bedding (Orera Composite Section, OCS) is exposed close to the Orera Village, in the northern margin of the basin. The correlation of the magnetostratigraphy of the OCS with the Geomagnetic Polarity Time Scale (GPTS), resulted in an age of 10.7-12.8 Ma for the entire section, which is supported by biostratigraphical data. The cyclic shallow lacustrine succession comprises 91 superposed small-scale cycles, each consisting mainly of an alternation of grey-greenish mudstone and white dolomite beds. Based on the number of cycles, the average periodicity of the basic small-scale cycles is approximately 23,000 yr. This periodicity suggests that deposition of the sedimentary cycles was controlled by astronomically induced climate changes causing lake-level fluctuations. The deposition of these cycles took place in a low gradient, shallow lake basin developed in an "inter-fan" zone (Miedes and Orera alluvial fans). The small-scale cycles are interpreted as a result of the evolution from mudflat deposits (red and green-grey clays), accumulated in lowstand periods of the lake, to shallow lake deposits (dolomites) during relatively high lake level stages.

Key words: lacustrine sediments, cyclostratigraphy, paleoclimate, Miocene, Calatayud Basin.

INTRODUCCIÓN

Los estudios realizados sobre secuencialidad y ciclicidad sedimentaria han cobrado una especial relevancia en los últimos años. Una gran parte de los mismos intenta establecer una relación entre la oscilación de los parámetros orbitales terrestres, su reflejo en el clima y, por tanto, en el registro sedimentario. Estos trabajos se han concentrado fundamentalmente en sedimentos marinos, a partir de los cuales se ha establecido una Escala Temporal de Polaridad Astronómica (APTS), que comprende la totalidad del Plio-Pleistoceno y ha sido extendida hasta los 12 Ma en el sector mediterráneo (Hilgen *et al.*, 1995).

El conocimiento de los cambios paleoclimáticos ha de basarse en el establecimiento de correlaciones cronoestratigráficas de alta resolución y precisión entre el registro sedimentario marino y continental. Los depósitos de ambientes continentales, en particular los sedimentos lacustres, se caracterizan en general por su alta susceptibilidad a las variaciones climáticas, aunque la existencia de

hiatos sedimentarios podría implicar una cierta pérdida del control de estas variaciones así como del registro temporal. De acuerdo con esto, la existencia de ambientes sedimentarios lacustres en los que una subsidencia regular favorece una sedimentación continua, posibilita un registro de los ciclos orbitalmente inducidos (ciclos de Milankovitch), minimizando el efecto de pérdida de registro relacionado con hiatos sedimentarios.

En la Península Ibérica, son muy escasas las secciones con sedimentos continentales en las que se reconoce un registro continuo de carácter cíclico, abarcando un intervalo temporal amplio. En la Cuenca de Calatayud, en concreto en la zona de Orera-Ruesca (margen septentrional de la cuenca, Fig.1), aflora una amplia sucesión lacustre (Orera Composite Section u OCS), de unos 160 m de espesor, que muestra un total de 91 ciclos superpuestos, con excelentes condiciones de exposición (Fig. 2). La edad de la sucesión es Aragoniense superior-Vallesiense inferior, de acuerdo con la correlación magnetoestratigráfica de la OCS con la Escala Temporal de Polaridad



FIGURA 1: Situación geográfica y esquema geológico de la Cuenca de Calatayud, con indicación de la zona de estudio y la posición de las subsecciones a partir de las cuales se ha compuesto la sección de Orera (OCS).

Geomagnética (GPTS), corroborada también bioestratigráficamente.

En este trabajo se lleva a cabo un análisis detallado de las litologías que componen los ciclos de la sucesión de Orera, su interpretación sedimentológica, la definición de las diferentes escalas de ciclicidad y, por último, una propuesta de las tendencias de evolución paleoclimática deducibles para la región durante un intervalo temporal superior a los 2 Ma.

CONTEXTO GEOLÓGICO Y ESTRATIGRAFÍA

La cuenca terciaria de Calatayud (Zaragoza), de dirección NO-SE, forma parte del sistema de fosas y subfosas tectónicas de carácter intramontañoso enclavadas en la Cordillera Ibérica (Fig. 1). En el relleno neógeno de la cuenca se reconocen tres unidades sedimentarias mayores, denominadas Unidad Inferior, Intermedia y Superior, separadas por dos rupturas sedimentarias principales (Sanz-Rubio, 1999). Las unidades Inferior e Intermedia presentan un modelo de distribución de facies definido por depósitos clásticos gruesos en los márgenes de cuenca que pasan progresivamente a sedimentos lacustres de naturaleza evaporítica y carbonática en zonas centrales (Ortí y Rosell, 2000). La Unidad Intermedia (Aragonienense medio-Vallesiense) se encuentra representada en sectores centrales-meridionales de la cuenca por depósitos de yeso laminado primario, en alternancia con carbonatos magnésicos (magnesita y dolomita), con una ordenación cíclica, y carbonatos palustres a techo, con variaciones de espesor condicionadas por movimientos tectónicos y procesos de paleokarstificación asociados (Sanz-Rubio *et al.*, 2001).

En posiciones intermedias entre las facies detríticas de margen y las facies evaporíticas centrales, dominan los materiales de naturaleza arcillosa y dolomítico-margosa.

En la zona de Orera-Ruesca, en el margen septentrional de la cuenca (Fig. 1), estos materiales arcillosos y dolomíticos, de origen lacustre, se disponen entre facies aluviales, quedando delimitados hacia el N-NO por el abanico aluvial de Orera y hacia el E por el de Miedes (Sanz-Rubio, 1999). La extensión de los depósitos lacustres entre ambos abanicos es reducida, aproximadamente 1,2 km, observándose una transición gradual desde las facies de abanico aluvial a una alternancia de arcillas y dolomías de margen lacustre y finalmente a facies centrales lacustres (arcillas y dolomías ordenadas cíclicamente). La relación estratigráfica entre estos depósitos y los evaporíticos de centro de cuenca es difícil de definir, al estar ambos conjuntos litológicos separados por el valle excavado por el Río Perejiles.

En el área de Orera-Ruesca, el estudio de 8 subsecciones (Fig. 1) parcialmente superpuestas y correlacionadas capa a capa ha permitido el levantamiento de la sección compuesta de Orera (OCS), formada por una sucesión cíclica de arcillas-margas y carbonatos acumuladas en ambiente lacustre. La OCS alcanza unos 160 m de potencia y ha sido objeto de un estudio cicloestratigráfico y magnetoestratigráfico de alta resolución (Abdul Aziz *et al.*, 2000). La correlación entre la magnetoestratigrafía de la OCS y la GPTS permite deducir una edad de 10,7-12,8 Ma para la sección (Fig. 2), concordante con las edades de micromamíferos obtenidos en varios yacimientos cercanos (Abdul-Aziz *et al.*, 2000).

DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE FACIES

Los sedimentos de la zona de Orera-Ruesca presentan cuatro tipos principales de facies: a) facies de abanico aluvial proximales y medias, que comprenden conglomerados clasto-soportados y areniscas-limos/arcillas subordinados con rasgos pedogenéticos incipientes; b) facies

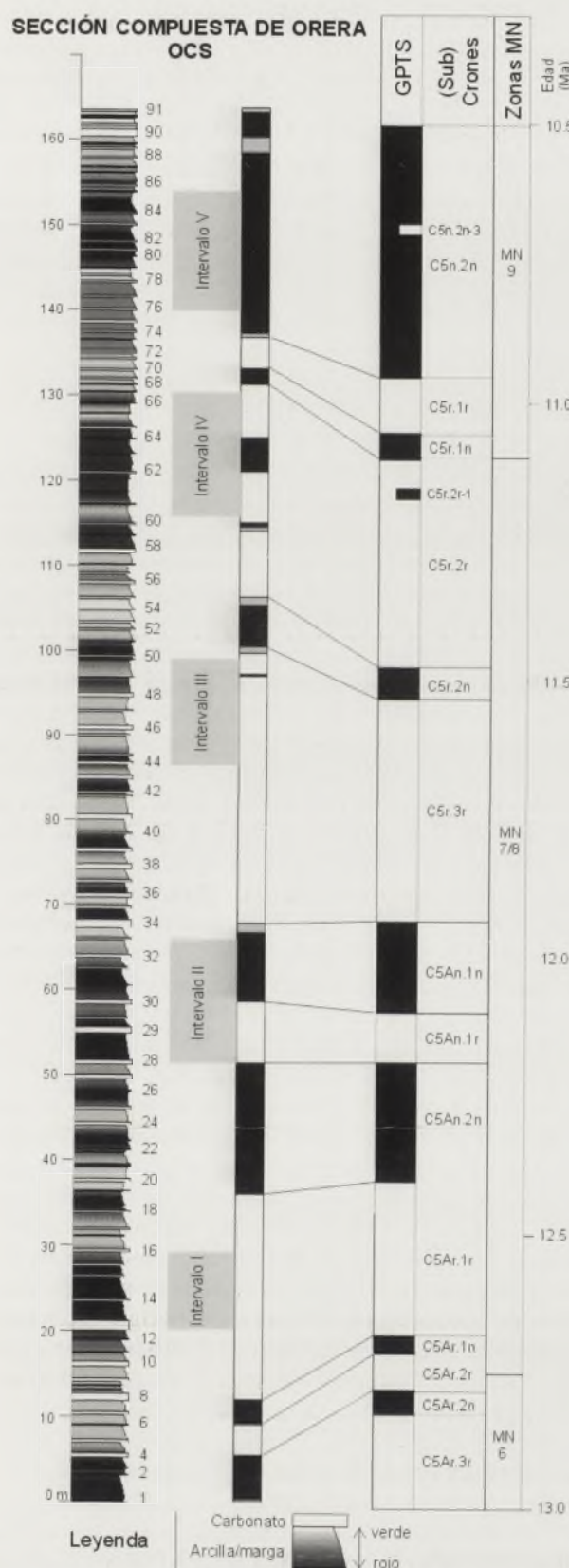


FIGURA 2: Representación de la sección compuesta de Orera, con indicación de los 91 ciclos sedimentarios menores reconocidos, los intervalos mayores de ciclicidad deducibles (ver explicación en el texto), y la columna magnetoestratigráfica obtenida a partir de la sección. Esta aparece correlacionada con la Escala Temporal de Polaridad Geomagnética (GPTS), indicándose asimismo la escala bioestratigráfica basada en las zonas de vertebrados de Mein.

distales de abanico aluvial, compuestas principalmente de arcillas/limos masivos y paleosuelos carbonatados; c) facies de margen lacustre que, en función de su posición frontal o lateral respecto de los sistemas de abanicos aluviales, están compuestas por areniscas, limos y carbonatos o bien por ciclos de arcillas-margas y dolomías arenoso-limosas; y d) facies lacustres someras que muestran el patrón de ciclicidad que queda representado en la OCS (Figs. 2 y 3). Es en estas últimas facies en las que se centra la siguiente descripción e interpretación:

Arcillas rojizas-marrones

Arcillas limosas masivas, no fosilíferas, donde el contenido de minerales de la arcilla (illita, interestratificados illita-esmectita y esmectita dioctaédrica, con pequeñas cantidades de caolinita y palygorskita) puede alcanzar el 100%, siendo prácticamente nulo el contenido en carbonato. Los espesores de los niveles oscilan entre unos pocos decímetros a 2,5 m. El porcentaje de granos de cuarzo y feldespato tamaño limo-arena varía entre 3 y 35%. Las arcillas muestran abundantes trazas de raíces marcadas por túbulos elongados verticalmente de color amarillento y/o verdoso.

Esta facies se interpreta como el depósito de arcillas y limos transportados en flujo laminar (arroyada difusa) de baja energía en ambientes de llanura lutítica seca, con bajo gradiente, en la periferia de lagos salinos (Hardie *et al.*, 1978; Tunbridge, 1984). Estas llanuras quedan sujetas a periodos prolongados de exposición subaérea, aunque con inundaciones periódicas y oscilaciones relativas del nivel freático, que dan lugar a procesos de hidromorfismo y colonización local por vegetales.

Arcillas-margas verdes a grises

Arcillas y margas masivas o con laminación muy difusa, intensamente bioturbadas por acción de raíces, con un espesor variable entre 1 y 1,5 m. El contenido en minerales de la arcilla (esmectita trioctaédrica y en menor proporción dioctaédrica, illita, interestratificados illita-es-



FIGURA 3: Vista de afloramiento de uno de los ciclos sedimentarios de pequeña escala en la sección de Orera (Valdelosterreros) (longitud del martillo usado como escala, 33 cm).

mectita y con bajo porcentaje en caolinita) varía entre el 55 al 99%. Otros componentes minerales son granos de cuarzo y feldespato de tamaño limo a arena (3-18%) y dolomita, que puede alcanzar hasta un 40% en algunos niveles. Texturalmente, el sedimento es una mezcla de granos terrígenos angulosos a subangulosos y peloides arcillosos y dolomicríticos inmersos en una masa arcillosa-margosa.

Esta litofacies se interpreta como resultado de descargas de flujos cargados de material siliciclástico fino con peloides arcillosos, de carácter episódico, en ambiente de llanura lutítica húmeda o salina (Hardie *et al.*, 1978). En este ambiente, la mayor estabilidad del nivel freático, debida a la recarga por aguas subterráneas, da lugar a períodos prolongados de saturación acuosa del sedimento (Wright y Sandler, 1994), manteniéndose éste bajo condiciones reductoras, que se reflejan en la coloración verde-gris de las arcillas y margas.

Dolomías

Niveles en conjunto carbonáticos, de 0,15 a 1 m de espesor, que consisten en alternancias de capas de dolomía blanca (3-15 cm de espesor) y capas, de 2 a 10 cm de espesor, de arcillas/margas verdes-grises. Los niveles dolomíticos, con un 65 a 93% de contenido en carbonato, muestran cierta variedad de rasgos sedimentarios, reconociéndose *ripples* de oscilación, *tepees* de pequeña escala y canales erosivos a techo de algunas capas. El carbonato puede consistir en dolomicrita uniforme y masiva o presentar estructura interna nodulosa; localmente, las capas de dolomía están formadas por rizolitos rellenos de dolomicrita, alineados lateralmente de forma densa. Texturalmente, las dolomías consisten en peloides dolomicríticos-arcillosos (0,05-1,7 mm), bien clasificados o flotando en una masa dolomicrítica, con granos de cuarzo de tamaño limo a arena subordinados. Localmente, se observan restos difusos de gasterópodos, ostrácodos y carofitas, así como grietas de desecación y huellas de raíces con pseudomorfo de anhidrita en algunas dolomías nodulares.

Los depósitos dolomíticos se acumularon en un ambiente lacustre muy somero, reflejando en cualquier caso períodos de nivel alto del lago (cm a dm de altura de la lámina de agua, Fig. 4). Los períodos de inundación de la cuenca lacustre, que propician la removilización y arrastre de peloides y granos siliciclásticos, son seguidos por períodos de concentración por evaporación, con incremento de la relación Mg/Ca, en los que tiene lugar la precipitación de carbonato bajo una lámina de agua progresivamente reducida. Los descensos relativos en el nivel del lago se traducen en el desarrollo de rasgos de nodulización, bioturbación, precipitación local de sales, formación de *tepees* e, incluso, retrabajado del sedimento carbonático por pequeños canales en condiciones de exposición subaérea. Por su parte, los niveles de arcillas/margas verdes-grises intercalados en las dolomías son el resultado de arroyadas episódicas con aporte de material siliciclástico, que se mantiene en condiciones de saturación en agua.

La relación geométrica entre estos depósitos cíclicos acumulados en ambiente lacustre y los sistemas aluviales adyacentes sugiere que el desarrollo de la cuenca lacustre tuvo lugar en un área de sombra entre dos abanicos aluviales mayores (Miedes y Orera) (Fig. 5). En esta situación, el relleno de la cuenca evolucionó en consonancia con la agradación vertical de los abanicos. La regularidad de los ciclos lacustres puede ser interpretada como un buen reflejo del equilibrio entre tasas de subsidencia y tasas de sedimentación en el margen norte de la Cuenca de Catalunya durante el intervalo temporal representado en la OCS.

ANÁLISIS DE LA CICLICIDAD

En la OCS se han reconocido dos escalas diferentes de ciclos sedimentarios, en función de la ordenación de las litologías básicas descritas anteriormente a lo largo de la sección. La ciclicidad más marcada queda definida por la superposición de 91 ciclos básicos de pequeña escala (Fig. 2), cada uno de ellos formado por un término inferior de arcillas verdes-grises, localmente con arcillas rojas, y uno superior de capas dolomíticas de color blanco (Fig. 3). El espesor medio de los ciclos es de 1,6 m, con un rango de variación entre 1,3 y 2,7 m. El espesor relativo de los carbonatos y arcillas en los sucesivos ciclos es, a su vez, variable, reconociéndose varios segmentos dentro de la sucesión (indicados como Intervalos I a V en la figura 2) en que hay un predominio de ciclos en los cuales el espesor de las arcillas es netamente superior al de carbonatos. Esta alternancia de intervalos pobres en carbonato, en los que, además, los ciclos básicos son difusos y menos regulares, con intervalos relativamente ricos en carbonato, en los que los ciclos básicos son regulares y bien desarrollados, define el segundo tipo de ciclicidad, caracterizado por ciclos de gran escala.

Basándose en el número de ciclos básicos reconocidos en la OCS (91) y contrastado este número con el intervalo temporal (10,7-12,8 Ma) definido magnetoestratigráficamente, la periodicidad media de los ciclos menores puede ser estimada en unos 23.000 años (ciclos de precesión), mientras que la ciclicidad de mayor escala se correspondería con una periodicidad de 400.000 años (ciclos de excentricidad). Una explicación más extensa de la metodología utilizada para la definición de estos patrones de ciclicidad ha sido presentada en Abdul Aziz *et al.* (2000).

CARACTERIZACIÓN PALEOCLIMÁTICA

La sucesión cíclica de sedimentos lacustres en Orera presenta varias tendencias que pueden ser utilizadas para definir la evolución climática de la región, y posiblemente del área centro-nororiental de la Península Ibérica, en el intervalo temporal correspondiente a buena parte del Aragoniense superior y parte inferior del Vallesiense.

La transición entre depósitos de llanura lutítica seca y húmeda (representados por las arcillas rojas y arcillas-margas verdosas a grises de los términos inferiores de los

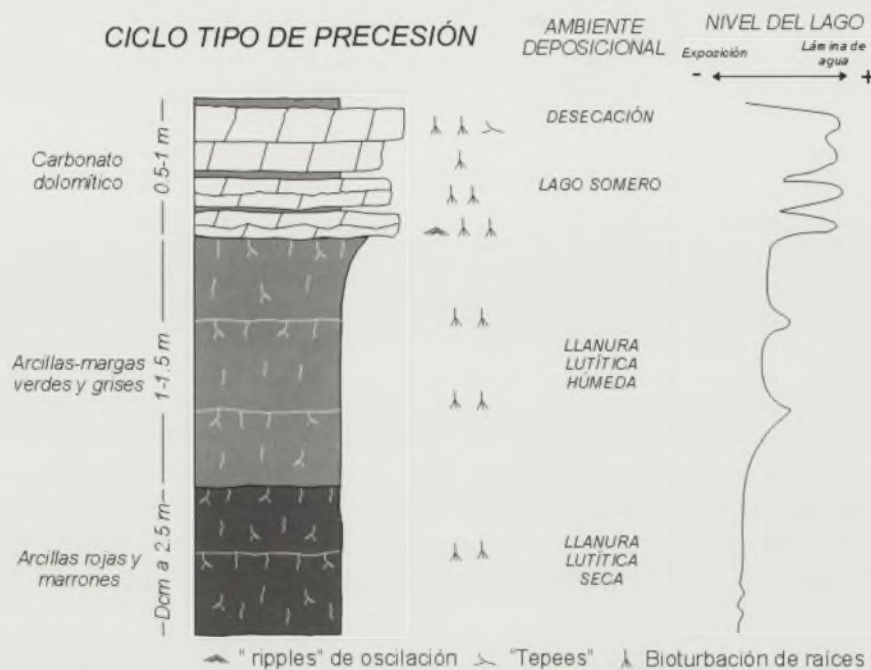


FIGURA 4: Representación esquemática de uno de los ciclos menores de la sucesión de Orera y su interpretación paleoambiental (ver explicación en el texto).

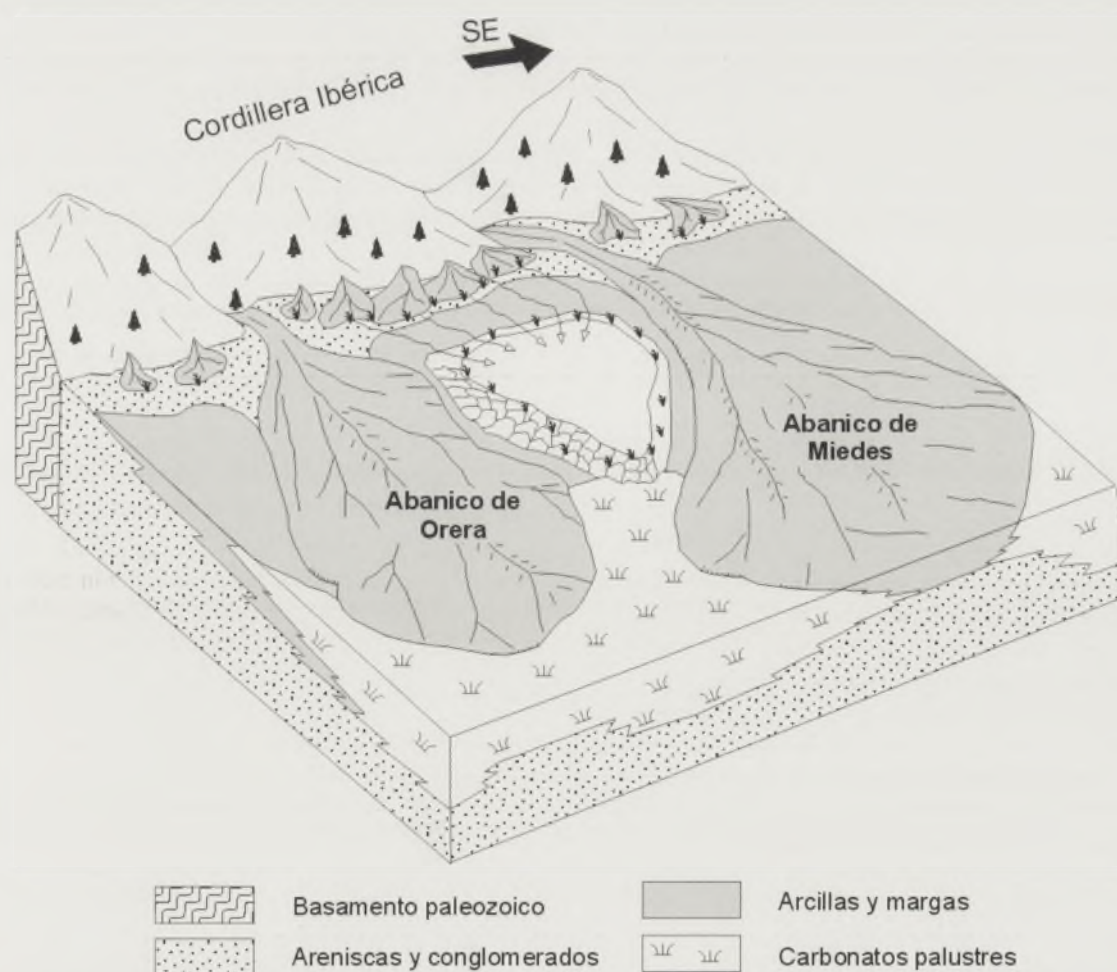


FIGURA 5.- Reconstrucción paleoambiental del sistema lacustre, interpretado como una cuenca desarrollada entre dos abanicos aluviales mayores, donde tuvo lugar el depósito de la sucesión cíclica de Orera.

ciclos de menor escala) a depósitos lacustres carbonatados, sugiere un incremento progresivo en el nivel del agua del lago. Esta variación puede ser interpretada como resultado de un cambio de condiciones climáticas relativamente secas y frías a relativamente húmedas y cálidas (Fig. 4) a lo largo de períodos de 23.000 años (ciclos de precesión).

Esta hipótesis está basada en la interpretación sedimentológica de los rasgos observables en los ciclos menores, pero también en las tendencias determinadas en los ciclos de mayor escala y la correlación de estos con la escala global de polaridad (Laskar *et al.*, 1993). Así, los ciclos mayores con predominio de niveles arcillosos (Intervalos I a V en la Fig. 2) corresponderían a períodos con condiciones climáticas relativamente secas, con máximo de insolación, en que el nivel del lago está en posición baja de forma más continua en el tiempo. Astronómicamente, estas condiciones coincidirían con períodos de mínima excentricidad. Por el contrario, los ciclos mayores, en los que predominan los carbonatos, siendo los ciclos básicos más regulares y marcados, son atribuibles a períodos, en conjunto, más húmedos (insolación mínima) en los que la altura del nivel del lago alcanzó intermitentemente sus mayores cotas. Estas últimas condiciones tuvieron lugar en períodos de excentricidad máxima.

Las conclusiones paleoclimáticas obtenidas mediante el análisis de la sucesión de Orera presentan un buen acuerdo con las evidencias paleoclimáticas derivadas del registro sedimentario marino para el intervalo temporal (10,7–12,8 Ma) considerado (Laskar *et al.*, 1993). Por otra parte, la calidad de afloramiento de la OCS, junto con la posibilidad que ofrece para extender la Escala Temporal de Polaridad Astronómica (APTS) hacia el Mioceno medio en series continentales, hace de la sección de Orera un lugar relevante de interés geológico y cultural (Calvo *et al.*, 1999).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido elaborado en el marco de los proyectos DGES PB98-0503, PB97-0244 y PB98-0691-CO3-03.

REFERENCIAS

- Abdul Aziz, H., Hilgen, F., Krijgsman, W., Sanz-Rubio, E. y Calvo, J.P. (2000): Astronomical forcing of sedimentary cycles in the middle to late Miocene continental Calatayud Basin (NE Spain). *Earth and Planetary Science Letters*, 177: 9-22.
- Calvo, J.P., Abdul-Aziz, H., Hilgen, F., Sanz-Rubio, E. y Krijgsman, W. (1999): The Orera Section (Calatayud Basin, NE Spain): A remarkable cyclically lacustrine succession from the Spanish Miocene. En: *Towards the balanced management and conservation of the geological heritage in the new millenium* (D. Baretino, M. Vallejo y E. Gallego, Eds.). SGE-IGME-ProGeo, Madrid, 186-192.
- Hardie, L.A., Smoot, J.P. y Eugster, H.P. (1978): Saline lakes and their deposits: a sedimentological approach. En: *Modern and ancient lake sediments* (A. Matter y M.E. Tucker, Eds.). Blackwell, Oxford, 7-41.
- Hilgen, F., Krijgsman, W., Langereis, C.G., Lourens, L.J., Santarelli, A. y Zachariasse, W. J. (1995): An astronomical (polarity) time scale for the Late Miocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 136: 495-510.
- Laskar, J., Joutel, F. y Boudin, F. (1993): Orbital, precessional, and insolation quantities for the Earth from – 20 Myr to +10 Myr. *Astronomy and Astrophysics*, 270: 522-533.
- Ortí, F. y Rosell, L. (2000): Evaporative systems and diagenetic patterns in the Calatayud Basin (Miocene, central Spain). *Sedimentology*, 47: 665-685.
- Sanz-Rubio, E. (1999): *Análisis de los sistemas deposicionales carbonáticos y evaporíticos del Neógeno de la Cuenca de Calatayud (provincia de Zaragoza)*. Tesis doctoral, Univ. Complutense, 579 p.
- Sanz-Rubio, E., Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., Calvo, J.P. y Rouchy, J.M. (2001): Calcitization of Mg-Ca carbonate and Ca sulphate deposits in a continental Tertiary basin (Calatayud Basin, NE Spain). *Sedimentary Geology*, 140: 123-142.
- Tunbridge, I.P. (1984): Facies model for sandy ephemeral stream and clay playa complex; the Middle Devonian Trentihoe Formation of North Devon, U.K. *Sedimentology*, 31: 697-716.
- Wright, V.P. y Sandler, A. (1994): A hydrogeological model for the early diagenesis of Late Triassic alluvial sediments. *Journal Geological Society London*, 151: 897-900.